



CHAPTER 11 / РОЗДІЛ 11

DEVELOPMENT OF METHODS FOR DETERMINING THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF ASPHALT

11.1. Методи визначення теплофізичних властивостей асфальтобетонів

Для визначення напружень що виникають в наслідок впливу температури необхідно в конструкції дорожнього одягу визначити розподіл температури. Для цього крім стандартних фізико-механічних властивостей матеріалів конструкції дорожнього одягу необхідно визначити ряд властивостей, які називають теплофізичними. До таких властивостей відносяться: теплопровідність, теплоємність, коефіцієнт чорноти, коефіцієнт тепловіддачі; коефіцієнт температурного.

Теплопровідністю називається здатність матеріалу передавати тепло від однієї поверхні до іншої. Ця властивість є головною як для великої групи теплоізоляційних матеріалів, так і для матеріалів, що застосовуються для влаштування зовнішніх стін і покриттів будівель.

Теплопровідність матеріалу характеризується кількістю теплоти, що пройшла через випробуваний матеріал товщиною 1 м і площею 1 м^2 при різниці температур на його протилежних поверхнях в $1\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 1 години. Теплопровідність вимірюється коефіцієнтом λ в $\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$ і може служити порівняльною характеристикою при оцінці теплозахисних властивостей різних матеріалів.

Теплопровідність матеріалів залежить від наступних факторів [1]:

- 1) фізичного стану і будови, які визначаються фазовим станом речовини; ступенем кристалізації і розмірами кристалів; анізотропією теплопровідності кристалів і напрямком теплового потоку ; об'ємом пористості матеріалу і характеристиками пористої структури;
- 2) хімічного складу і наявності домішок, останні особливо впливають на теплопровідність кристалічних тіл;



3) умов експлуатації, що залежать від температури, тиску, вологості матеріалу.

Розрахункову теплопровідність визначають за додатком до ДБН В.2.6-31:2006 "Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель" [2] або експериментально за допомогою різних приладів [3-5, 9].

Експериментальні методи визначення коефіцієнта теплопровідності базуються на певних теоретичних передумовах і засновані на вимірюванні кількості тепла, що проходить через випробовуваний зразок нормованих розмірів за певний час при заданому перепаді температур.

Вимірювач теплопровідності МИТ – 1 призначений для оперативного визначення коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів (легких, сотових, важких бетонів, глиняного і силікатної цегли, теплоізоляційних матеріалів) у виробках і окремо виготовлених зразках.

Метод вимірювання теплопровідності заснований на принципі регулярного режиму і встановлює залежність температури поміщеного в матеріал тіла, що нагрівається (зонда) від теплопровідності навколишнього його матеріалу.

Вимірювання теплопровідності проводиться за допомогою теплового циліндричного зонда постійної електричної потужності нагріву по вимірюванню його температури за певний інтервал часу.

Принцип дії приладу заснований на вимірюванні зміни температури вимірювального зонда за певний час при його нагріванні постійною потужністю.

Прилад складається з електронного блоку, вимірювального зонда (далі зонда) і зовнішнього джерела живлення з вихідною напругою 9 В, необхідного для забезпечення достатньої потужності нагрівача в процесі вимірювань. Зовнішній вигляд приладу наведено на рисунку 1. На лицьовій панелі корпусу електронного блоку розташовані клавіатура і вікно графічного дисплея. У верхній торцевій частині корпусу знаходиться роз'єм для підключення зонда, а також роз'єм USB для зв'язку з комп'ютером для обробки результатів. На задній панелі в нижній частині корпусу знаходиться кришка батарейного відсіку.



На лівій бічній стінці є кистьовий ремінець, на правій бічній стінці отвір для підключення зовнішнього джерела живлення.



Рисунок 1 – Загальний вигляд вимірювача теплопровідності МИТ 1

Зонд має діаметр 6,0 мм, при вимірі він повинен бути поміщений всередину зразка з забезпеченням максимального теплового контакту зонда із зразком. Для цього у зразку свердлять отвір $\varnothing 6^{+0,1}_{+0,05}$ мм. Зонд повинен щільно, без люфта входити в отвір, стінки отвору повинні бути рівні, без рваних країв. Слід мати на увазі, що чим більше повітряних прошарків між зондом і досліджуваним матеріалом, тим вище похибка вимірювання. Також не допускається м'яти матеріал при свердлінні отвору, тому що при цьому змінюється щільність матеріалу, а з нею і його теплопровідність (особливо це відноситься до теплоізоляційних матеріалів).

Зразок матеріалу (або випробовуваний об'єкт) перед вимірюванням повинні бути підготовлені. У зразку свердлиться отвір $\varnothing 6$ мм глибиною 100 мм. Відстань між отворами має бути не менше 100 мм, відстань від отвору до найближчої, паралельної йому, поверхні виробу – не менше 75 мм. Зонд щільно вставляється в підготовлений отвір. В задню стінку отвору зонд упиратися не повинен. Для матеріалів з гладкими негіроскопічними стінками бажано використовувати



теплопровідне мастило для поліпшення теплового контакту між зондом і випробуваним матеріалом. Змащування зонду необхідно виконувати також у тому випадку, якщо матеріал не дозволяє вставляти вимірювальний зонд досить щільно, без зазору між стінками отвору і зондом. Як мастила може бути використано технічний вазелін, гліцерин, солідол, чи тол, графітна змазка або теплопровідні пасти. Якщо випробуваний матеріал має пористу структуру, змазка при нагріванні повинна залишатися досить густою, щоб не вбиратися в пори. При проникненні мастила в пори випробуваного матеріалу результати вимірювання спотворюються.

Для будь-яких матеріалів бажано, щоб зонд вставлявся в отвір щільно, з мінімальним зазором.

При визначенні коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів в лабораторних умовах необхідно готувати зразки-куби 150 x 150 x 150 мм або 200 x 200 x 200 мм з відповідним отвором в центрі куба.

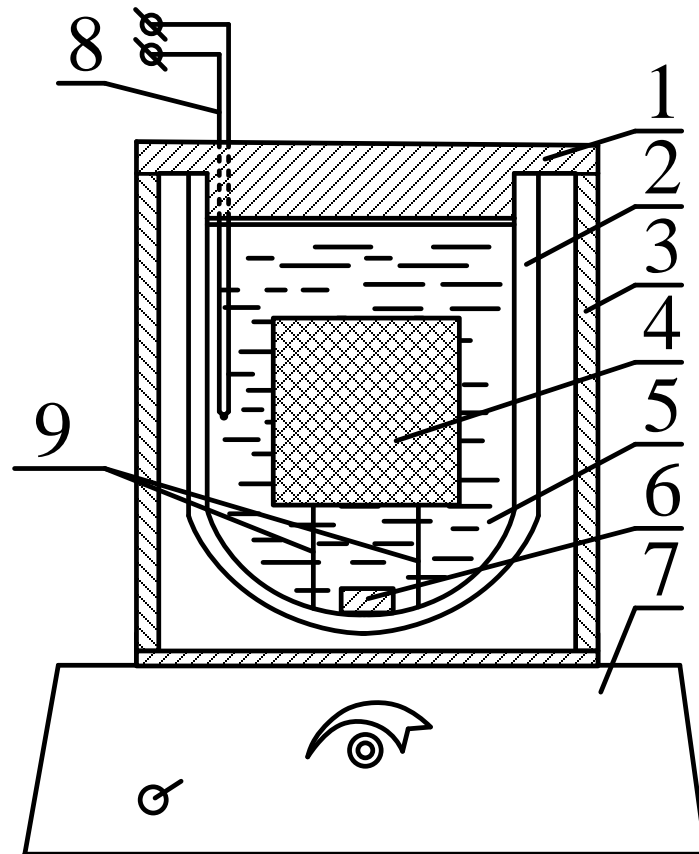
Перед вимірюванням зразок необхідно витримати разом із зондом при температурі вимірювання не менше двох годин. Для випробувань при температурі, що відрізняється від навколишнього, зразки повинні поміщатися в термостат з матеріалу з низькою теплопровідністю, наприклад, з пінополістиролу.

Для проведення випробувань матеріалу при негативній температурі пасивний термостат із зразком матеріалу і вставленим зондом встановлюють в морозильній камері і термостатують при заданій температурі протягом 2-4 годин.

Точність вимірювання залежить від відповідності отвори розмірами зонда. Недоцільно проводити вимірювання, якщо розміри отвору перевищують розміри зонда більш ніж на 15-20 %.

Методика визначення питомої теплоємності створена на основі ГОСТ 23250-78 «Метод визначення питомої теплоємності».

Конструктивна схема установки для визначення питомої теплоємності наведена на рисунку 2.



1 – кришка калориметра; 2 – посуд Дьюара; 3 – корпус калориметра з термоізоляцією;
4 – зразок; 5 – рідина; 6 – стрижень магнітної мішалки; 7 – магнітна мішалка; 8 – термометр
для вимірювання температури рідини; 9 – підставка для зразка

Рисунок 2 – Конструктивна схема установки для визначення питомої теплоємності

Установка для визначення питомої теплоємності, конструктивна схема якої наведена на рисунку 2, містить у собі наступні елементи.

Калориметр, який становить собою посудину Дьюара ємністю 2000 мл, поміщений в опорний водонепроникний циліндричний кожух без дна з теплоізоляційною кришкою, що має проріз для нитки підвісу капсули і паз для установки термометра Бекмана. У калориметр з дистильованою водою під час дослідження опускається для охолодження нагрітий зразок або еталон.

У випадку, якщо контакт зразка з рідиною небажаний, зразок поміщується у водонепроникну капсулу з поліетиленової плівки.



Вимірювач термо-ЕРС термопари – електронний цифровий вольтметр, що забезпечує вимірювання температури нагрітої капсули із зразком або еталона з точністю до 0,15 °С.

Секундомір типу С1-2а для відліку часу досліду з точністю до 1 с.

Підготовка до випробування заключається у наступному. Досліджуваний зразок у формі прямого циліндра висотою 10 см і діаметром 10 см висушується і поміщується у камеру постійної температури. Температура нагрівання зразка не повинна викликати в ньому деструктивних змін. При необхідності матеріал розміщується у капсулі з поліетиленової плівки. Масу зразка визначають з точністю до 0,1 г.

Визначення водяного еквівалента калориметра відбувається наступним чином. Водяний еквівалент калориметра визначається перед початком кожного випробування. Водяний еквівалент калориметра визначається шляхом заміни в досліді капсулу із зразком мідним еталонем.

Підготовка калориметра відбувається наступним чином. Калориметр зі стрижнем магнітної мішалки в ньому зважується з точністю до 0,1 г, після чого до нього наливається 1 л рідини. Маса рідини з точністю до 0,1 г визначається по різниці мас наповненого і порожнього калориметра. Калориметр встановлюється на магнітну мішалку, перевіряється обертання стрижня мішалки, після чого він закривається кришкою.

Вимірювання відбуваються наступним чином. Капсула із зразком витримується у термокамері заданої постійної температури протягом 1 години. Після цього він занурюється у калориметр, калориметр закривається кришкою, включається магнітна мішалка і починається реєстрація температури калориметра з точністю до 0,1 °С через кожні 1 хв. Час фіксується за секундоміром.

Вважається, що між зразком і рідиною встановлена теплова рівновага, якщо протягом 1 хв температура рідини у калориметрі змінюється менше ніж на 0,1 °С.



Після проведення вимірювань температура капсула із зразком висушується марлевым тампоном і зважується. Якщо маса капсули із зразком збільшилася більш ніж на 0,5 г, дослід вважають недійсним .

Обробка результатів вимірювань виконується наступним чином. За результатами вимірювань будується графік залежності температури калориметра від часу у масштабі – 1°C відповідає 100 мм за віссю ординат, 1 хв відповідає 5 мм за віссю абсцис. Приклад експериментального графіка наведений на рисунку 3.

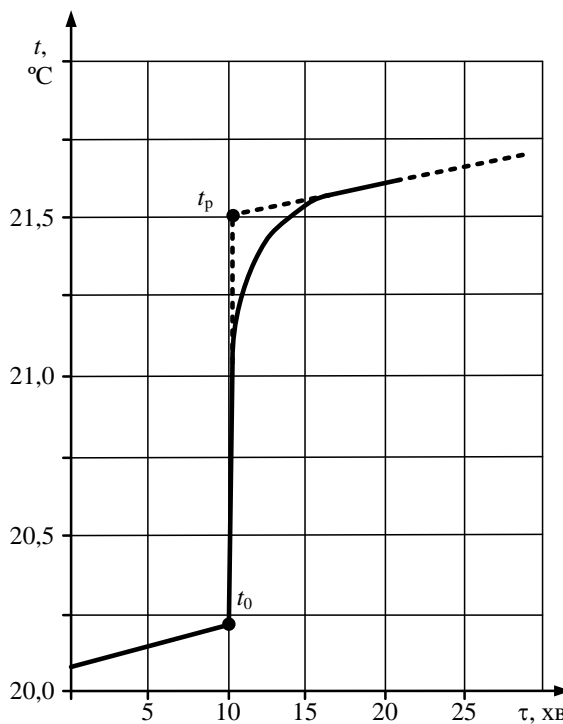


Рисунок 3 – Залежність температури калориметра від часу

За графіком, приклад якого наведений на рисунку 3, визначають наступні величини:

– температуру калориметра у момент занурення капсули із зразком або еталону у калориметр t_0 , так як відлік температури калориметра і занурення не збігаються за часом;

– температуру теплової рівноваги між капсулою із зразком або еталонном і калориметром t_p , яка знаходиться шляхом екстраполяції, щоб виключити теплоту, отриману калориметром при обертанні стрижня магнітної мішалки.



Водяний еквівалент калориметра E з точністю до 0,1 г обчислюється (1):

$$E = \frac{M_e C_e (t_b - t_p) - Q_{втр}}{C_{рід} (t_p - t_0)} - M_{рід}, \quad (1)$$

де M_e – маса еталона, г;

C_e – питома теплоємність матеріала еталона, Дж/(кг·К);

t_b – температура нагрітого еталона, °С;

t_p – рівноважна температура калориметра, °С;

$C_{рід}$ – питома теплоємність рідини, $C_{рід} = 4187$ Дж/(кг·К);

t_0 – температура калориметра у момент занурення еталона, °С;

$M_{рід}$ – маса рідини, г.

Питома теплоємність C з точністю до 10 Дж/(кг·К) обчислюється (2):

$$C = \left[\frac{(M_{рід} + E) C_{рід} (t_p - t_0) + Q_{втр}}{t_b - t_0} - M_k C_k \right] : M_0, \quad (2)$$

де t_b – температура нагрітої капсули зі зразком, °С;

M_k – маса капсули, г;

C_k – питома теплоємність матеріала капсули, Дж/(кг·К);

M_0 – маса зразка, г.

Питома теплоємність зразка матеріалу в інтервалі температур ($t_b - t_p$) обчислюється як середнє арифметичне результатів трьох вимірювань, виконаних для даного зразка.

Питома теплоємність матеріалу в інтервалі температур ($t_b - t_p$) визначається за трьома зразками.

Відносна похибка визначення питомої теплоємності за даною методикою не перевищує 5 %.



Конвективний теплообмін дорожньої одежі з навколишнім середовищем моделюється як тепловіддача при обтіканні повітрям плоскої поверхні (пластини).

Коли температура поверхні пластини і температура потоку, що набігає різні, між поверхнею пластини і потоком повітря відбувається процес теплообміну. Відповідно до закону Ньютона – Ріхмана густина теплового потоку пропорційна величині температурного напору (3):

$$q = \alpha_t (t_{\text{пл}} - t_{\text{пов}}), \quad (3)$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

$t_{\text{пл}}$ – температура поверхні пластини, °С;

$t_{\text{пов}}$ – температура повітря, °С.

Коефіцієнт тепловіддачі α залежить від гідродинамічної картини руху повітря і теплофізичних властивостей середовища. У процесі теплообміну біля поверхні пластини формується тепловий примежовий шар, в межах якого температура повітря змінюється від значення $t_{\text{пл}}$, рівного температурі пластини, до температури повітря далеко від поверхні $t_{\text{пов}}$. Характер розподілу температури в тепловому примежовому шарі залежить від режиму течії рідини в динамічному примежовому шарі.

Так, при ламінарному примежовому шарі відношення товщини динамічного $\delta_{\text{л}}$ і теплового $\Delta_{\text{л}}$ шарів залежить тільки від числа Прандтля Pr , тобто від теплофізичних властивостей теплоносія. Це означає, що залежність від швидкості та відстані зберігається такою ж, як і для динамічного шару. При значенні $Pr = 1$ товщини шарів виявляються рівними один одному: $\delta_{\text{л}} = \Delta_{\text{л}}$. При ламінарній течії перенесення теплоти між шарами повітря, що рухаються уздовж поверхні, здійснюється шляхом теплопровідності. При турбулентному примежовому шарі основна зміна температури відбувається в межах тонкого в'язкого підшару близько поверхні, через який теплота переноситься також тільки шляхом теплопровідності. У турбулентному ядрі примежового шару через



інтенсивне перемішування рідини зміна температури незначна і поле температур має рівний, пологий характер.

Таким чином, як при ламінарному, так і при турбулентному режимі руху повітря в примежовому шарі між розподілом температур і швидкостей існує якісна схожість.

При збільшенні різниці температур ($t_{\text{пл}} - t_{\text{пов}}$) відбувається додаткове ускладнення процесу, пов'язане із зміною фізичних параметрів повітря. Чим значніше перепади температур, тим більше відрізняються в'язкість, теплопровідність і теплоємність теплоносія в різних точках в межах примежового шару. Як наслідок цей ефект впливає на інтенсивність тепловіддачі.

У тих випадках, коли температурний напір змінюється по поверхні теплообміну, середній коефіцієнт тепловіддачі доцільно визначати за співвідношенням (4):

$$\bar{\alpha}_t = \frac{Q}{(\bar{t}_{\text{пл}} - \bar{t}_{\text{пов}})F} = \frac{\bar{q}}{\bar{t}_{\text{пл}} - \bar{t}_{\text{пов}}}. \quad (4)$$

Таке визначення показує, що середній коефіцієнт тепловіддачі є частка від ділення середньої по поверхні густини теплового потоку (5):

$$\bar{q} = \frac{Q}{F} = \frac{1}{F} \int_F q dF \quad (5)$$

На середній по поверхні температурний напір (6):

$$\bar{t}_{\text{пл}} - \bar{t}_{\text{пов}} = \frac{1}{F} \int_F (t_{\text{пл}} - t_{\text{пов}}) dF. \quad (6)$$



Для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі дорожнього покриття використовується формула, запропонована проф. Т.В. Самодуровою [6] (7):

$$\alpha_t = 0,00058 \cdot V^{1,15} \cdot h^{0,15} \cdot \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\nu_{\text{пов}}} \quad (7)$$

де h – шорсткість покриття, мм;

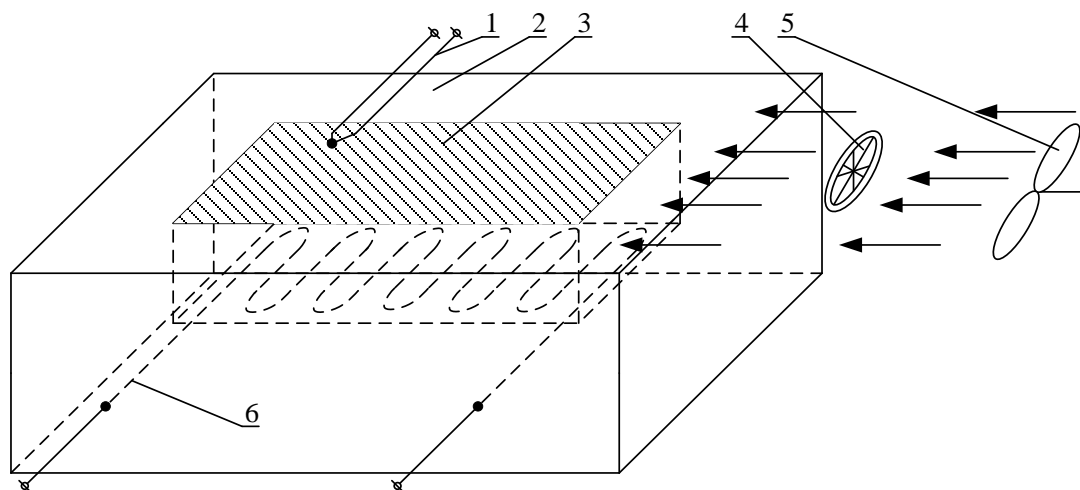
$\lambda_{\text{пов}}$ – теплопровідність повітря, Вт/(м·К);

$\nu_{\text{пов}}$ – кінематична в'язкість повітря, м²/с;

V – швидкість вітру, м/с.

Експериментальне визначення коефіцієнта тепловіддачі поверхні зразка відбувається наступним чином.

Призначений для визначення α_t зразок може бути вирізаний з поверхні дороги так і виготовлений окремо. Принципова схема цього метода наведена на рисунку 4.



1 – термопара; 2 – термоізоляція; 3 – поверхня зразка, для якої визначається α_t ; 4 – анемометр; 5 – повітродувка; 6 – електронагрівач

Рисунок 4 – Метод експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі плоскої поверхні



Зразок, за виключенням поверхні 3, розміщується у термоізоляцію 2. Термоізоляція становить собою шар пінопласту товщиною 10 см. Від зразка його відділяє прошарок азбесту товщиною 4 мм. Поверхня зразка 3 обдувається за допомогою повітрорудувки 5, швидкість потоку повітря вимірюється портативним анемометром 4, а температура потоку – термометром.

Потужність теплового потоку через поверхню 3 дорівнює потужності електричного струму, який проходить через електронагрівач 6. Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі поверхні 3 визначається за допомогою залежності (4).

Коефіцієнт чорноти (або ступінь чорноти) - ϵ показує відношення енергії теплового випромінювання сірого тіла згідно із Законом Стефана Больцмана, до випромінювання абсолютно чорного тіла при тій же температурі. Коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла $\epsilon = 1$.

Коефіцієнт випромінювання – міра здатності об'єкта поглинати випромінювати ІЧ- енергію. Величина коефіцієнта може бути в діапазоні від 0 (дзеркало) до 1 (абсолютно чорне тіло). Якщо встановлюється коефіцієнт, значення якого перевищує дійсне, то значення температури, отримане пірометром, буде нижче реального, за умови що температура об'єкта вище температури навколишнього середовища. Наприклад, якщо встановлено коефіцієнт 0.95, а дійсний поправочний коефіцієнт дорівнює 0.9, то значення показуваної температури буде нижче, ніж її реальне значення.

Коефіцієнт випромінювання об'єкта може бути визначений наступними способами:

1. Визначте значення температури об'єкта за допомогою контактного пробника, термомпари або іншим можливим способом. Потім виміряйте температуру об'єкта і регулюйте значення коефіцієнта випромінювання, поки значення температури, отримане пірометром, не збіжиться із значенням, отриманим за допомогою контактного пробника. Таким чином ви отримаєте правильний коефіцієнт випромінювання вимірюваного матеріалу.

2. При вимірі відносно низьких температур (до плюс 260 °С), покрита частина поверхні об'єкта пластмасовою липкою стрічкою, розмір якої достатньо



великий, щоб закрити пляму вимірювання. Потім виміряйте температуру наклейки з встановленим коефіцієнтом 0.95. Після цього виміряйте температуру в області поряд з наклейкою і відкоригуйте встановлене значення коефіцієнта на приладі, поки не досягнете значення температури на наклейці. Таким чином ви отримаєте правильний коефіцієнт випромінювання.

3. Якщо можливо, нанесіть на поверхню об'єкта чорну фарбу. Коефіцієнт випромінювання фарби повинен бути вище 0.98. Потім виміряйте температуру зафарбованої області з встановленим коефіцієнтом випромінювання 0.98. Після цього виміряйте температуру незафарбованої області та відкоригуйте встановлене значення коефіцієнта на приладі, поки не досягнете значення температури на зафарбованій поверхні. Таким чином ви також отримаєте правильний коефіцієнт випромінювання вимірюваного матеріалу.

Використовуючи перший спосіб визначення коефіцієнту чорноти, необхідно застосовувати інфрачервоний термометр або тепловізор, який дозволяє встановлювати значення коефіцієнту випромінювання, наприклад (рисунок 5).

Методика визначення коефіцієнту чорноти полягає у визначенні температури поверхні асфальтобетонного покриття за допомогою двох приладів: тепловізора з можливістю регулювання коефіцієнту випромінювання та будь-який прилад, що дозволяє вимірювати температуру асфальтобетонного покриття шляхом безпосереднього контакту з покриттям.

Завдяки безпосередньому контакту приладу з поверхнею матеріалу визначається точне значення температури покриття. Результат вимірювання температури покриття біля місця вимірювання контактним приладом за допомогою тепловізора може відрізнятися, за значенням від результату контактного приладу. Регулюванням значення коефіцієнту випромінювання на інфрачервоному приладі значення температур зрівнюються.

Отримане значення коефіцієнту випромінювання поверхні дорівнює коефіцієнту чорноти цієї поверхні.



Рисунок 5 – Загальний вигляд тепловізора Flir

11.2. Розробка методики визначення коефіцієнта температурного розширення асфальтобетонів

Істинним термічним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР) називається відношення лінійного розміру тіла, поділеного на його початковий розмір, малому зміні температури (8):

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dt}, \text{ град}^{-1}. \quad (8)$$

Істинний ТКЛР визначається по нахилу дотичної до кривої відносної зміни довжини зразка від температури. Великою істинного ТКЛР зазвичай користуються в тому випадку, якщо вимагається знання коефіцієнта розширення при даній температурі. Середній ТКЛР в заданому інтервалі температур називається відношення довжини зразка до заданого інтервалу зміни температури (9):



$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_1 - l_0}{t_1 - t_0}, \text{ град}^{-1}. \quad (9)$$

Для визначення ТКЛР використовуються прямі та непрямі методи визначення, до яких пред'являються наступні вимоги:

– вимірювач подовження досліджуваних зразків повинен володіти високою чутливістю і достатньою точністю;

– нагрівальна піч повинна забезпечувати рівність температур у всіх ділянках досліджуваного зразка;

– пристрій для виміру температури зразка повинно мати високу точність і чутливість;

– прилад повинен бути надійним і простим в експлуатації, а виготовлення досліджуваних зразків не вимагати великих трудовитрат.

До непрямих методів вимірювання ТКЛР відносяться рентгенівський метод, метод подвійної нитки та поляризаційно-оптичний метод. До прямих або абсолютним методів вимірювання ТКЛР відносяться такі методи, у яких зміна довжини зразка в заданому інтервалі температур фіксується безпосередньо в ході експерименту.

В абсолютних методах зміна довжини зразка в заданому інтервалі температур визначається безпосередньо в експерименті. Прилади для вимірювання ТКЛР називаються дилатометрами.

Найбільш важлива характеристика дилатометра – його чутливість до абсолютного зміни розмірів тіла. Поширення отримали оптико-механічні, ємнісні, індукційні, інтерференційні, рентгенівські, радіо-резонансні дилатометри.

Оптичні дилатометри надзвичайно різноманітні за конструкції та принципу дії. У найпростішому випадку зміна довжини зразка визначається шляхом спостереження за зміщенням його торця через мікроскопічні або телескопічні пристрої. Такі дилатометри називають також компараторними.



В ємнісних дилатометрах зміна розмірів досліджуваного зразка приводить до зміни ємності конденсатора, який служить в них датчиком (іноді поверхня зразка є однією з пластин конденсатора). Для визначення зміни розмірів зразка щодо зміни ємності прилад попередньо калібрують, чутливість ємнісного дилатометра $\sim 10^{-9}$ град⁻¹.

В індукційних дилатометрах зміна розміру зразка викликає взаємне зміщення котушок індуктивності, що призводить до зміни їх взаємної індуктивності. Для визначення зміни розмірів зразка індукційного дилатометра здійснюють попередню калібрування приладу. Чутливість індукційної дилатометра дорівнює приблизно 10^{-9} град⁻¹.

У інтерференційнім дилатометрі, заснованому на принципі Фізо, отримують інтерференційну картину при освітленні монохроматичним світлом двох оптичних пластин (з кварцу або сапфіра), між якими розташований досліджуваний зразок. Оскільки інтерференційна картина виходить при накладенні пучків світла, відображених тільки від нижньої площини верхньої пластини і від верхньої площини нижньої (інші картини забираються з поля зору спеціальним розташуванням пластин), то зсув інтерференційних смуг відбувається тільки при зміні довжини зразка. По зсуву смуг і довжині світлової хвилі розраховують зміна довжини зразка. Чутливість інтерференційного дилатометра $\sim 10^{-8}$ см.

Рентгенівським дилатометром (по суті установкою для рентгеноструктурного аналізу) вимірюють зміна параметрів кристалічної решітки досліджуваного тіла за рентгенограмами, знятим одним з відомих способів. Чутливість рентгенівського дилатометра в перерахунку на макророзміри $\sim 10^{-5}$ - 10^{-6} см.

У радіо-резонансних дилатометрах датчиком служить порожнистий резонатор, який може бути виготовлений з досліджуваного матеріалу або мати пружну стінку, з'єднану із зразком. В обох випадках при зміні розмірів досліджуваного зразка змінюється об'єм резонатора, що приводить до зміни резонансної частоти. По зсуву резонансної частоти розраховується зміна



розмірів зразка. Чутливість радіо-резонансного дилатометра доведена до 10^{-12} см.

Принцип дії кварцових дилатометрів заснований на визначенні різниці між подовженням зразка з досліджуваного матеріалу і кварцового скла. Температурна межа використання кварцових дилатометрів визначається схильністю кварцового скла кристалізуватися при підвищених температурах. Досвід показує, що при тривалій експлуатації дилатометрів навіть до температури 600-700 °С на поверхні кварцових деталей з'являється кристалічна плівка. При температурі понад 800 °С кристалізація йде більш інтенсивно і експлуатація приладів небажана.

В залежності від положення зразка в процесі виміру дилатометри поділяють на горизонтальні і вертикальні.

Визначення коефіцієнта лінійного розширення асфальтобетону пов'язано з необхідністю обчислення температурних напружень при вивченні деформацій асфальтобетонних дорожніх покриттів, пов'язаних із зміною температури. Крім того, цей коефіцієнт повинен входити в розрахунок довжини ділянок, асфальтобетонного покриття між температурними швами.

Виходячи з цього, авторами [7] була поставлена задача розробити метод визначення величини коефіцієнта лінійного розширення асфальтобетону в різних температурних інтервалах, тобто визначити відношення подовження асфальтобетону при підвищеній температурі на 1° С до його довжини при 0 °С (або який-небудь інший початковій температурі).

При постановці даного питання передбачалося отримання декілька відмінних один від одного даних для різних температурних інтервалів, оскільки асфальтобетон являє собою неоднорідний матеріал, який веде себе при підвищених температурах (приблизно від плюс 10° С і вище), як пластичне тіло, а при знижених (від плюс 10° до 0° і нижче), як тверде тіло.

Відомі численні способи визначення коефіцієнта розширення головним чином для твердих тіл, серед яких варто відзначити наступні: Лапласа і Лавуазьє,



Рей і Рамсдена, Фусса і Глотзеля, диференціальний метод Борда, метод «дзеркала і шкали».

Метод Лапласа і Лавуазьє полягає в тому, що під впливом зміни температури стрижень kl (рисунок 6), що знаходиться в ванні, наповненій спочатку льодом, що тане, а потім маслом або водою (нагрітої до певної температури), впливає на вертикальний прямокутник lo і зорову трубу ab , що обертається навколо точки o . Зорова труба змінює кут зору, тобто переміщує візирну лінію of до положення os ; fs – вертикальний масштаб на певній відстані від точки o . $A=1\text{ т}$ – подовження стрижня kl . По відношенню fs : $\Delta:fo:ol$ визначається коефіцієнт розширення стрижня kl .

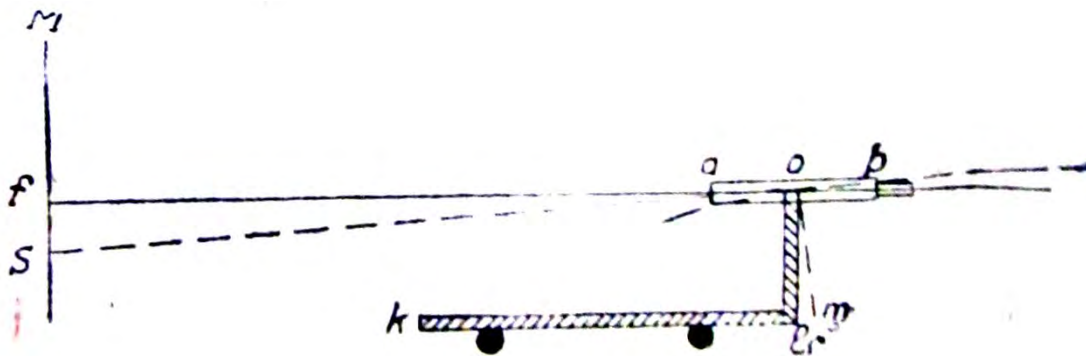


Рисунок 6 – Ділатометр за методом Лапласа і Лавуазьє

Метод Рей і Рамсдена вимагає більш складного обладнання. Процес визначення за цим методом полягає в тому, що випробовуваний зразок поміщається у ванну, наповнену рідиною, нагрітої до певної температури. Ванна з зразком встановлюється на столі між двома такими ванночками, заповненими льодом. Всі три ванни мають оптичні прилади (рисунок 7), причому кільця з нитками $A' A''$ об'єктив $B' B''$ і окуляр $C' C''$ встановлюються на одній прямій лінії. Під впливом зміни температури випробовуваний зразок разом із встановленим на ньому об'єктивом пересувається, завдяки чому відбувається зміщення загальної візирної лінії. Визначення величини коефіцієнта лінійного розширення здійснюється мікрометром, зсуваючи об'єктив B'' на деяку відстань, необхідне для збереження зміщеною візирної лінії під впливом зміни температури зразка.



Відношення величини переміщення мікрометра до початкової довжини зразка при деякій температурі t дає (при відповідному обчисленні) величину коефіцієнта розширення зразка.

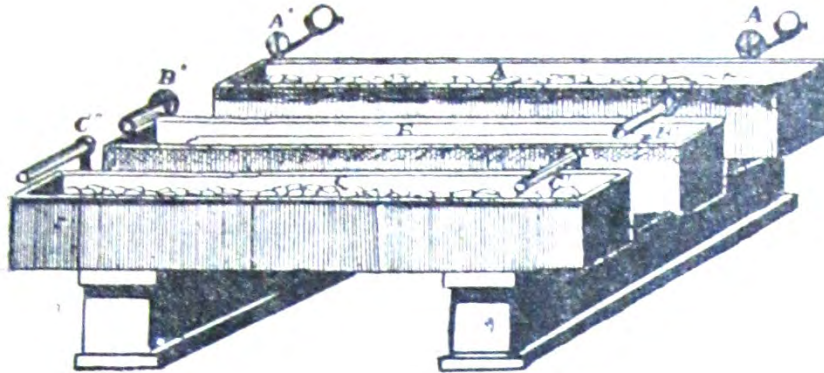


Рисунок 7 – Ділатометр за методом Рей і Рамсдена

Метод Фусса і Глотзеля полягає в наступному: вертикальний стрижень з випробовуваного матеріалу поміщається всередині мідної трубки, зануреною в ємність, в якій можна швидко змінювати температуру, пропускаючи струмінь пари або води. Стрижень знизу опирається на гвинт мікрометра, а зверху впирається у коротке плече важеля. Довгим плечем важеля є стрілка, вістрям своїм вказує на поділ вертикальної дугового шкали. За допомогою мікрометричного гвинта переміщують стрижень після кожного нагрівання або охолодження в таке положення, щоб стрілка вказувала на нуль поділу. Число оборотів головки мікрометра іншого гвинта визначає шукану зміну довжини стрижня.

Диференціальний метод Борда заснований на принципі ковзання випробовуваного зразка при зміні температури за добре відшліфованому матеріалу з відомим коефіцієнтом розширення. Схема визначення представлена на рисунок 8. Кінці A та A' нерухомі. При нагріванні B' ковзає вздовж AB , внаслідок чого відлік ноніуса змінюється. Знаючи коефіцієнт розширення AB , визначають коефіцієнт розширення $A'B'$.



Рисунок 8 – Ділатометр за методом Фусса і Глотзеля

Метод «дзеркала і шкали» аналогічний методу Лапласа і полягає в оптичному вимірі подовження зразка АВ за допомогою спеціально встановленого дзеркальця, на яке падає горизонтальний промінь світла SO (рисунок 9). При зміні температури відбувається подовження або зкорочення зразка, а разом з цим і переміщення спеціально угвинченого штифтика. Переміщення штифтика, що упирається в нижній край дзеркальця, створює нахил дзеркальця під кутом COD, а значить змінюється кут відбиття падаючого променя SO.

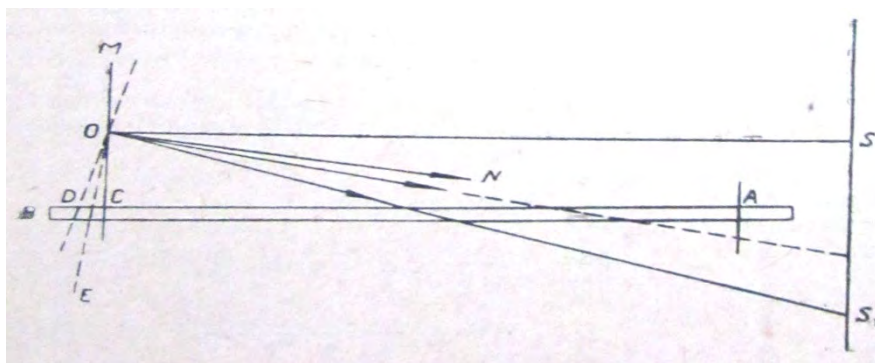


Рисунок 9 – Метод дзеркала і шкали

Із схеми випливає, що (10, 11):

$$LSOS_1 = LSON + LNOS_1 = L2COD \quad (10)$$

$$CD = CO \tan COD. \quad (11)$$

Шукане зміна довжини (12):

$$CD = CO \tan \frac{SOS_1}{2} \quad (12)$$



Подальше визначення зводиться до обчислення кута SOS_1 . Описані методи мають ряд позитивних сторін і дають досить точні показники, однак скористатися ними не представлялося можливим внаслідок того, що деякі з існуючих способів розраховані на визначення коефіцієнта розширення виключно твердих речовин мало змінюють свої властивості при зміні температури. Крім того, за допомогою зазначених приладів експеримент не може охопити температурний інтервал в 105° (від плюс 70 до мінус 35), особливо при необхідності тривалого витримування при низьких температурах, що може бути досягнуто при ретельної ізоляції матеріалу від навколишнього середовища.

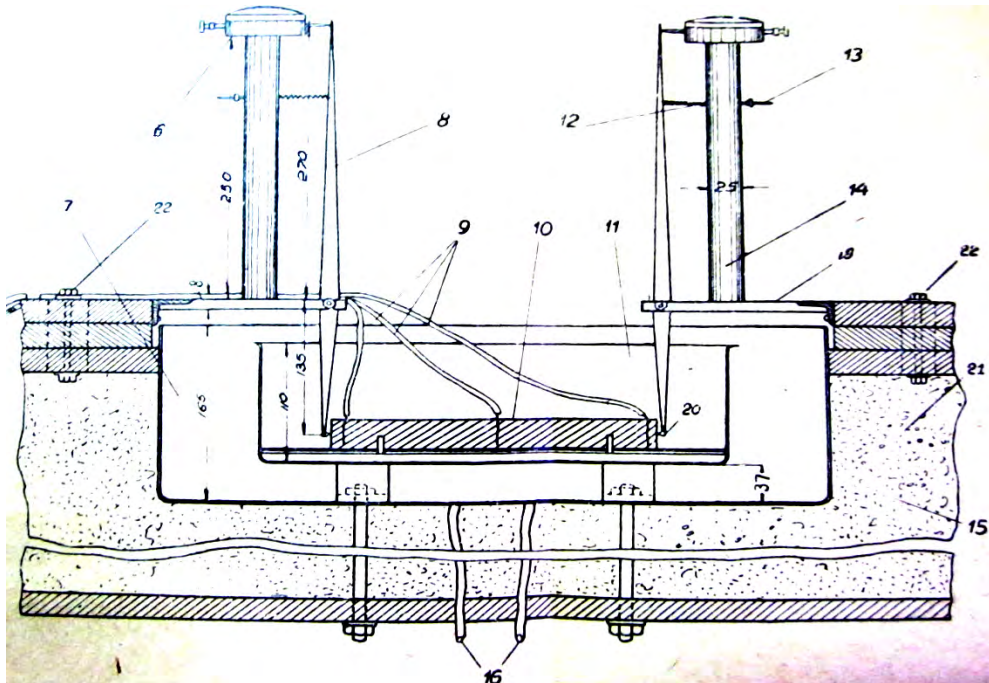
Нарешті багато методів, як, наприклад, Рей і Рамсдема, Фізо і Аббе, а також способи визначення коефіцієнта розширення інтерферометром Костерса і оптиметром Цейсса дуже складні і вимагають спеціальної апаратури.

Проф. Сюньї Г.К. була запропонована конструкція ділатометра для асфальтобетонних зразків, який дає можливість визначати коефіцієнт розширення асфальтобетону в значних температурних інтервалах. Сконструйований прилад можна розділити на три основні частини: 1) призначену для вимірювання деформації зразка, 2) призначений для фіксування температури, 3) підтримує ту чи іншу температуру зразка.

Частина приладу, призначена для вимірювання деформацій, складається з двох індикаторів 6 (рисунок 10) з точністю показань до 0,05 мм. і важеля 8. Індикатори нерухомо укріплені на жорстких металевих стійках 14, які, в свою чергу, міцно з'єднані з виступами цапф 19. Передавальний важіль, вільно підвішений на центрах цапф, верхнім плоским кінцем впирається в індикатор, нижнім торкається торця зразка.

Нижня, більш коротка частина передавального важеля забезпечена мідної контактної призмою на шарнірі 20, яким, власне, і здійснює контакт з торцем зразка.

Притискання верхній частині передавального важеля (більш подовженою) до движка індикатора здійснюється пружиною 12, що має гайковий регулятор 13. Виступи цапф за допомогою металевих кутників прикріплені спеціальними



1 - гальванометр, 2 - тримач термопар, 3 - термометр, 4 - комутатор, 5 - ванна з термопарами, 6 - індикатори, 7 - зовнішня ванна (холодильник), 8 - передавальний важіль, 9 - термопари, 10 - зразок, 11 - внутрішня ванна, 12 - пружина, 13 - регулятор пружини, 14 - стійка, 15 - тирса, 16 - випускні трубки, 17 - пружина-тримач, 18 - цапфи, 19 - виступи цапф, 20 - контактна призма, 21 - термос, 22 - болти з контргайками

Рисунок 10 – Прилад для визначення лінійного коефіцієнта розширення асфальтобетону

болтами 22 до дубовим пластинок. Наявність цих болтів і довгастих отворів у пластинках дає можливість переміщати, у разі необхідності, вимірювальну частину приладу в горизонтальному і вертикальному напрямках.

Частина приладу, що фіксує температуру, складається з термопар, комутатора, гальванометра та термометра. Термопари 9, що складаються з двох проводів (мідь + константан), ізольованих один від одного скляними бусами, укладені в гнучку гумову трубку. Один кінець термопари, вставлений в зразок, що являє собою спай константанового і мідного дроту. Два дроти іншого кінця термопари спаяні з мідними проводами, є провідниками від термопари до гальванометру. Ці два спаю опущені через пробку в скляні пробірки, підвішені до проводів за допомогою сургучу і пробки. Ці пробірки опущені в скляний



циліндр з водою, причому для стійкості пробірок і проводів влаштований тримач термопар 2. Мідні провідники з'єднують термопари з комутатором 4, який представляє собою ебонітову дощечку з контактами і обертовим перемикачем, що з'єднує одну з термопар з гальванометром; гальванометр 1 відноситься до типу ϕ – гальванометрів з опором $R=130$ типу С1 і служить для свідчення температури в зразку.

Термометр 3 застосовувався психометричний зі шкалою від плюс 50 до мінус 30 і точністю показання до $0,1^\circ$. Він закріплювався на штативі і опускався в циліндр з водою. В якості контрольного термометра для визначення температури середовища, в якій знаходиться досліджуваний зразок, застосовувався термометр типу ґрунтового глибинного з точністю $0,2^\circ\text{C}$. Цей термометр опускається у ванну, де розташований зразок, і утримується кришкою ванни.

Частина приладу, що дає можливість підтримувати тривалий час постійну температуру, складається з внутрішньої, жорстко укріпленої мідної ванни 11, в якій міститься зразок, і зовнішньої залізної ванни 7 холодильника. Обидві ванни укладені в дерев'яний ізолюючий ящик з кришкою 23, який влаштований за принципом термоса.

Всередині мідної ванни на металевому виступі припаяні круглий тонкі дротики, на яких розміщується зразок асфальтобетону; до дна цієї ванни припаяні чотири бічних держателя, утримують зразок від бічного переміщення.

І в мідній ванні, і в залізній влаштовані спускні отвори (для випуску з приладу води і гліцерину), що закінчуються гумовими трубками 16 зі скляними наконечниками.

Принцип дії приладу полягає в тому, що під впливом охолодження або нагрівання зразок асфальтобетону, покладений в металеву ванну, змінює свою довжину. Це укорочення або подовження передається через контактну призму і передавальний важіль движку індикатора. Наявність двох індикаторів забезпечує більш точне фіксування зміни довжини зразка.



В якості охолоджувальної суміші застосовується суміш товченого льоду і солі (у співвідношенні 2 до 1). В процесі випробувань зразок знаходився в незамерзаючому (до мінус 3,5 °С) гліцериновому середовищі.

Методика визначення коефіцієнта лінійного розширення асфальтобетону полягала в наступному: готувалася звичайним способом асфальтобетонна суміш, причому температура розігріву бітуму відповідала 180°, мінеральних матеріалів 200 ° і суміші (асфальтобетон) 160°. Підігрів бітуму і суміші проводився через піщану прошарок, що відокремлює посудину, в якому знаходилися зазначені матеріали, від джерела тепла, при ретельному перемішуванні матеріалів протягом 10 хв. Асфальтобетонний зразок (брусок 250 x 50 x 28 мм) встановлювався точно по центру ванни, з тим щоб стрілки індикаторів могли обертатися як в одну, так і в іншу сторону, що відповідає середньому положенню виступу движка індикатора в вирізі останнього.

Встановивши зразок і включивши термопару і гальванометр, обидві ванни приладу наповнювали водою температури 23 °. Ця температура була прийнята за 0 при тарування термопар, так що спочатку експерименту температура у ванні завжди була 23 °, тобто, такий, як і у ванні з другими спаями термопару 5; при такому температурному режимі стрілка гальванометра показувала 0.

Зразок витримувався у водяній ванні протягом 40 хв.; попутно відзначалася температура зразка з гальванометру (спочатку завжди 0) і проводився відлік за двома показниками. Далі температура зразка змінювалася до потрібної і підтримувалася протягом 40 хв.

Коли зразок брав температуру середовища, проводився відлік за двома індикаторами, і потім процес при іншій температурі середовища тривав аналогічним чином.

Богуславський А.М. [7] запропонував прилад (рисунок 11) для визначення температурних деформацій асфальтобетонних зразків загальний вигляд якого наведено на рисунку 11, який дозволяв визначати деформацію асфальтобетонних зразків за різної швидкості охолодження.

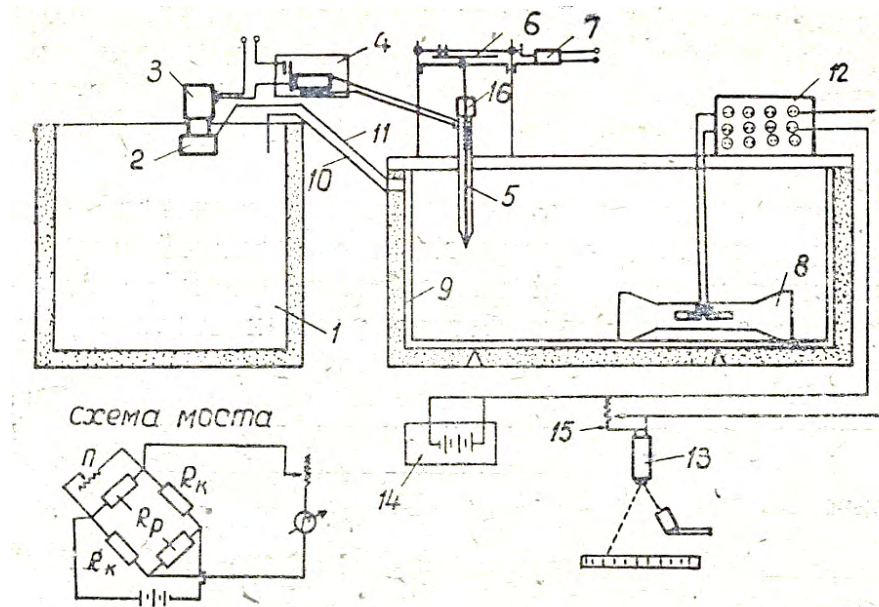


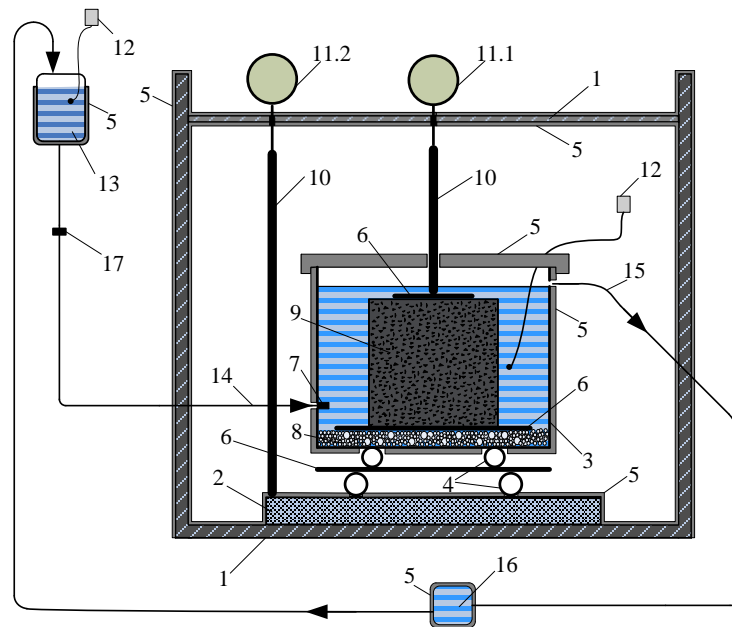
Рисунок 11 – Прилад для визначення деформації зразків асфальтобетону

В запропонованій установці вимірювання деформації виконували за допомогою проволочних тензодатчиків, що були наклеєні на зразок асфальтобетону. Тобто при вимірюванні можливі похибки в наслідок використання датчиків та клею, що мають власні значення термічних деформацій. Крім того регулювання температури відбувалося за рахунок циркуляції води з сіллю, що також може вплинути на значення коефіцієнту деформації.

В теперішній час питання температурної тріщиностійкості стає все гостріше, але й досі не є вирішеною проблема визначення температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетону. Так в ХНАДУ на кафедрі вишукування та проектування автомобільних доріг під керівництвом проф. Ряпухіні В.М. [8] розроблено прилад для визначення ТКЛД (рисунок 12).

Асфальтобетонний зразок розміщується у ємкості з кварцевого скла, заповнену теплоносієм. Зразок стоїть на пластині з кварцевого скла, яка в свою чергу розміщена на крихтах з кварцевого скла. Крихти зі скла виконують дві функції:

- дозволяють рівно встановити зразок;



- 1 – металевий каркас установки; 2 – бетонна підставка; 3 – ємкість із кварцового скла;
 4 – трубочки із кварцового скла; 5 – теплоізолюючий матеріал (вспінений поліетилен);
 6 – пластинка із кварцового скла; 7 – пристрій для розподілення теплоносія; 8 – крихти із кварцового скла; 9 – асфальтобетонний зразок; 10 – штовхач із кварцового скла;
 11.1 – електронний індикатор для фіксації деформації зразка; 11.2 – контрольний індикатор;
 12 – термометр; 13 – терморегуляційна камера теплоносія; 14 – трубочка для подачі теплоносія; 15 – трубочка для відводу теплоносія; 16 – пристрій для перекачування теплоносія; 17 – регулятор швидкості руху теплоносія.

Рисунок 12 – Схема установки для визначення ТКЛР асфальтобетону

– дозволяють теплоносію, проникаючи в пори між крихтами рівномірно прогрівати асфальтобетонний зразок не тільки зверху і з боків, а і знизу.

Зміна розміру асфальтобетонного зразка через штовхач з кварцового скла вимірюється електронним індикатором переміщень з точністю 0,001 мм. Між штовхачем і зразком розташована пластинка з кварцового скла розміром 40×40 мм для того, щоб виключити можливість вдавлення штовхача в зразок, для більш точного вимірювання зміни розміру зразка. Тиск пружини електронного індикатора переміщення становить 0,11 кг, а віднесене до поверхні скляної пластини складе 0,0007 МПа, тобто є допустимим.

Штовхачі, пластини, трубки, крихти і ємкість виконані з кварцового скла, оскільки цей матеріал має незначну теплопровідність і дуже малий ТКЛР



($0,6 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$) в порівнянні з асфальтобетоном, цементобетоном і металом (відрізняється приблизно в 100 раз). Загальна товщина пластини під зразком, скляних крихт і дна ємкості складають 10 мм. Оскільки вони виконані з кварцевого скла, то при зміні температури теплоносія на $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (максимальний діапазон температур при випробуваннях) змінять розмір на 0,00024 мм і ніяк не вплинуть на результат вимірювань.

Теплоносій доводиться до необхідної температури в терморегуляційній камері і подається до ємкості з зразком за рахунок дії сили тяжіння, з швидкістю, яку можливо регулювати. Таким чином теплоносій циркулюючи між терморегуляційною камерою, в якій встановлюється необхідний температурний режим, та ємкістю з досліджуваним зразком рівномірно і поступово нагріває, охолоджує або підтримує сталу температуру асфальтобетонного зразка. Температура окремо контролюється у терморегуляційній камері і безпосередньо біля зразка.

Для випробування були використані асфальтобетонні зразки циліндричної форми з діаметром 71,4 мм та висотою $71,4 \pm 1,5$ мм. Підготовка зразків до випробувань полягає в наступному:

- підбирається не менше трьох зразків одного типу;
- бокова поверхня зразка змазується силіконом, для захисту від розмиву і вологонасичення;
- у кожного зразка на металевій плиті шліфуються торцеві поверхні;
- заміряються розміри зразка (висота і діаметр) мікрометром з точністю до 0,01 мм в 4-5 місцях по висоті зразка та в 2-3 місцях при вимірюванні діаметра зразка.

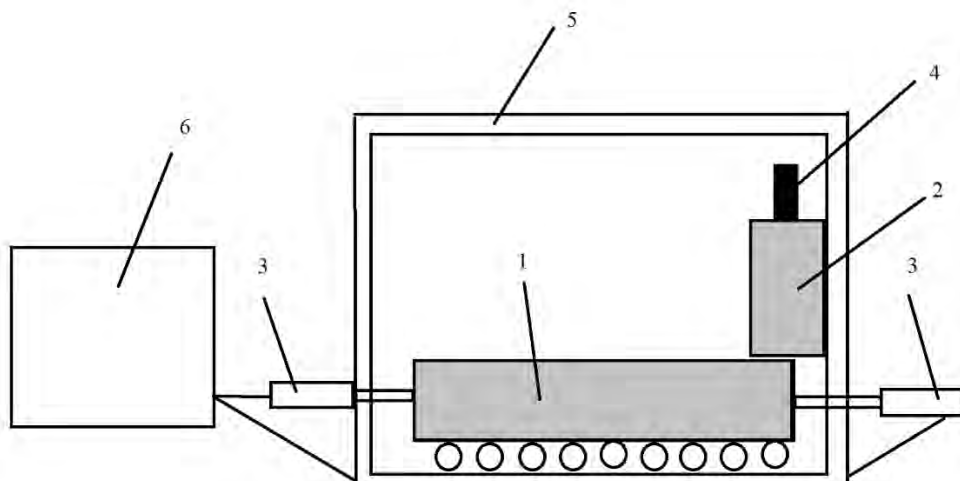
Зразок витримується при постійній температурі для стабілізації температурних деформацій, оскільки асфальтобетон і теплоносій можуть мати різні температури. Випробування можна розпочинати після стабілізації деформації, коли протягом години не змінюються значення на електронному індикаторі. Після цього зі швидкістю $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ за хвилину нагрівається або



охолоджується теплоносієм в терморегуляційній камері і відповідно в ємкості з зразком.

Але більшість вище наведених методів мають суттєві недоліки. Один з них витримання зразка в теплоносієві в якості якого може бути вода, гліцерин чи інші матеріали, що можуть потрапити в пори асфальтобетонного зразка та вплинути на значення ТКЛР. Наступним недоліком є використання зразків розміри, яких накладають певні обмеження на досліджувані асфальтобетони. Використання в конструкції приладів крихких та досить коштовних матеріалів теж є недоліком. У зв'язку з цим запропонована нова конструкція приладу для визначення ТКЛР, що розроблено на кафедрі будівництва та експлуатації автомобільних доріг ХНАДУ.

Для нагріву та охолодження зразків в процесі випробування використовується кліматична камера, що дозволяє регулювати швидкість зміни температури, при цьому в якості теплоносія використовується повітря, а не рідина як в попередніх випадках. Замість крихкого кварцевого скла передбачається використання сплаву Інвар. Випробування буде виконуватися на зразках баличках розмірами 100x100x300 мм, що дозволить випробовувати крупнозернисті асфальтобетони для нижніх шарів покриття (рисунок 13).



1 – зразок асфальтобетону, що підлягає випробуванню ; 2 – зразок асфальтобетону для контролю температури; 3 – прилад визначення переміщення; 4 –термопара, що занурена в центр зразка асфальтобетону; 5 –термошафа; 6 –блок переробки інформації; 7 – комп'ютер

Рисунок 13 – Прилад для визначення ТКЛР



Використовуючи цей метод температурний коефіцієнт лінійного розширення визначається за формулою (13):

$$\alpha^{a\bar{b}} = \frac{1}{l_{a\bar{b}}^1} \cdot \left(\frac{\delta^2 + \delta^1}{\Delta t} \right), \quad (13)$$

де $l_{a\bar{b}}^1$ – початкова довжина зразка асфальтобетону;

$\delta^2; \delta^1$ – різниця відліку за індикаторами;

Δt – різниця температури.

11.3. Визначення температурного коефіцієнту лінійного температурного розширення

В результаті серії випробувань визначено температурний коефіцієнт лінійного розширення різних типів асфальтобетонів в режимі нагріву та охолодження. Розраховано довірчий інтервал значень температурного коефіцієнту лінійного розширення з прийнятою надійністю результату 0,95 та середньоарифметичне значення температурного коефіцієнту лінійного розширення, таблиці 1.

Таблиця 1 – Зведена таблиця експериментально отриманих значень температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетонів

Характеристика	Температурний інтервали, °C		
	від 40 до 20	від 20 до 5	від 5 до 0
1	2	3	4
Піщаний, тип Г з розміром зерна до 2,5 мм. БНД 40/60 8% бітуму Коефіцієнт варіації	$(37,4 \div 40,0) \cdot 10^{-6}$ середнє $38,7 \cdot 10^{-6}$ 0,03	$(43,8 \div 46,8) \cdot 10^{-6}$ середнє $45,3 \cdot 10^{-6}$ 0,03	$(46,3 \div 49,1) \cdot 10^{-6}$ середнє $47,7 \cdot 10^{-6}$ 0,02
$(23,5 \div 25,3) \cdot 10^{-6}$ середнє $24,4 \cdot 10^{-6}$ 0,03	$(31,3 \div 32,7) \cdot 10^{-6}$ середнє $32,0 \cdot 10^{-6}$ 0,02	$(33,8 \div 35,4) \cdot 10^{-6}$ середнє $34,6 \cdot 10^{-6}$ 0,02	$(43,7 \div 45,9) \cdot 10^{-6}$ середнє $44,8 \cdot 10^{-6}$ 0,01



Характеристика	Температурний інтервали, °C		
	від 40 до 20	від 20 до 5	від 5 до 0
1	2	3	4
Піщаний, тип Г з розміром зерна до 2,5 мм. БНД 90/130 8% бітуму Коефіцієнт варіації	(25,2÷26,8)·10 ⁻⁶ середнє 26,0·10 ⁻⁶ 0,03	(34,3÷36,1)·10 ⁻⁶ середнє 35,2·10 ⁻⁶ 0,02	(37,2÷39,4)·10 ⁻⁶ середнє 38,3·10 ⁻⁶ 0,02
Піщаний, тип Г з розміром зерна до 2,5 мм. БМП 40/60-56 8% БМП Коефіцієнт варіації	(46,5÷49,1)·10 ⁻⁶ середнє 47,8·10 ⁻⁶ 0,02	(52,1÷54,7)·10 ⁻⁶ середнє 53,4·10 ⁻⁶ 0,02	(56,8÷59,4)·10 ⁻⁶ середнє 58,1·10 ⁻⁶ 0,02
Дрібнозернистий, тип Б з розміром зерна до 20 мм. БНД 40/60 6% бітуму Коефіцієнт варіації	(23,5÷25,3)·10 ⁻⁶ середнє 24,4·10 ⁻⁶ 0,03	(31,3÷32,7)·10 ⁻⁶ середнє 32,0·10 ⁻⁶ 0,02	(33,8÷35,4)·10 ⁻⁶ середнє 34,6·10 ⁻⁶ 0,02
Дрібнозернистий, тип Б з розміром зерна до 20 мм. БНД 60/90 6% бітуму Коефіцієнт варіації	(20,3÷21,7)·10 ⁻⁶ середнє 21,0·10 ⁻⁶ 0,03	(29,4÷31,4)·10 ⁻⁶ середнє 30,4·10 ⁻⁶ 0,03	(31,0÷33,4)·10 ⁻⁶ середнє 32,2·10 ⁻⁶ 0,03
Дрібнозернистий тип Б з розміром зерна до 20 мм. БНД 90/130 6 % бітуму Коефіцієнт варіації	(15,0÷17,2)·10 ⁻⁶ середнє 16,1·10 ⁻⁶ 0,06	(24,6÷27,0)·10 ⁻⁶ середнє 25,8·10 ⁻⁶ 0,04	(26,7÷28,5)·10 ⁻⁶ середнє 27,6·10 ⁻⁶ 0,03
Дрібнозернистий, тип Б з розміром зерна до 20 мм. БМП 40/60-56 6% БМП Коефіцієнт варіації	(28,7÷30,3)·10 ⁻⁶ середнє 29,5·10 ⁻⁶ 0,02	(36,6÷39,0)·10 ⁻⁶ середнє 37,8·10 ⁻⁶ 0,03	(41,5÷44,3)·10 ⁻⁶ середнє 42,9·10 ⁻⁶ 0,03
Дрібнозернистий, тип Б з розміром зерна до 20 мм. БМП 60/90-52 6% БМП Коефіцієнт варіації	(23,3÷25,9)·10 ⁻⁶ середнє 24,6·10 ⁻⁶ 0,05	(35,1÷37,1)·10 ⁻⁶ середнє 36,1·10 ⁻⁶ 0,02	(36,8÷39,2)·10 ⁻⁶ середнє 38,0·10 ⁻⁶ 0,03
Дрібнозернистий, тип Б з розміром зерна до 20 мм. БМП 90/130-49 6% БМП Коефіцієнт варіації	(18,1÷20,3)·10 ⁻⁶ середнє 19,2·10 ⁻⁶ 0,05	(28,0÷29,6)·10 ⁻⁶ середнє 28,8·10 ⁻⁶ 0,02	(32,1÷34,3)·10 ⁻⁶ середнє 33,2·10 ⁻⁶ 0,03
Дрібнозернистий тип Б з розміром зерна до 10 мм. БНД 40/60 6,5 % бітуму Коефіцієнт варіації	(26,0÷28,6)·10 ⁻⁶ середнє 27,3·10 ⁻⁶ 0,04	(34,4÷36,8)·10 ⁻⁶ середнє 35,6·10 ⁻⁶ 0,03	(35,9÷38,3)·10 ⁻⁶ середнє 37,1·10 ⁻⁶ 0,03
Дрібнозернистий тип Б з розміром зерна до 10 мм. БМП 40/60-56 6,5 % БМП Коефіцієнт варіації	(33,5÷36,1)·10 ⁻⁶ середнє 34,8·10 ⁻⁶ 0,03	(45,3÷47,7)·10 ⁻⁶ середнє 46,5·10 ⁻⁶ 0,02	(46,2÷48,6)·10 ⁻⁶ середнє 47,4·10 ⁻⁶ 0,02
ЩМА – 5 БМП 60/90 7,2 % бітуму Коефіцієнт варіації	(24,7÷26,1)·10 ⁻⁶ середнє 25,4·10 ⁻⁶ 0,02	(34,4÷36,2)·10 ⁻⁶ середнє 35,3·10 ⁻⁶ 0,02	(39,1÷41,3)·10 ⁻⁶ середнє 40,2·10 ⁻⁶ 0,02



Характеристика	Температурний інтервали, °С		
	від 40 до 20	від 20 до 5	від 5 до 0
1	2	3	4
ЩМА – 5 БМП 90/130 7,2 % бітуму Коефіцієнт варіації	$(22,6 \div 24,0) \cdot 10^{-6}$ середнє $23,3 \cdot 10^{-6}$ 0,03	$(32,9 \div 34,7) \cdot 10^{-6}$ середнє $33,8 \cdot 10^{-6}$ 0,02	$(35,9 \div 37,9) \cdot 10^{-6}$ середнє $36,9 \cdot 10^{-6}$ 0,02
ЩМА – 15 БМП 60/90 6,2 % бітуму Коефіцієнт варіації	$(22,5 \div 24,5) \cdot 10^{-6}$ середнє $23,5 \cdot 10^{-6}$ 0,04	$(28,6 \div 31,0) \cdot 10^{-6}$ середнє $29,8 \cdot 10^{-6}$ 0,03	$(36,4 \div 39,0) \cdot 10^{-6}$ середнє $37,7 \cdot 10^{-6}$ 0,03
ЩМА – 15 БМП 90/130 6,2 % бітуму Коефіцієнт варіації	$(19,8 \div 21,6) \cdot 10^{-6}$ середнє $20,7 \cdot 10^{-6}$ 0,04	$(25,9 \div 27,1) \cdot 10^{-6}$ середнє $26,5 \cdot 10^{-6}$ 0,02	$(31,6 \div 33,2) \cdot 10^{-6}$ середнє $32,4 \cdot 10^{-6}$ 0,02

При аналізі результатів експериментального дослідження виявлено, що при охолодженні значення температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетону відрізняється для різних інтервалів температур. Для всіх типів асфальтобетону значення температурного коефіцієнту лінійного розширення зростає при зменшенні температури в діапазоні позитивних температур від плюс 40 °С до 0 °С в 1,2-1,8 рази. Величина зростання значень температурного коефіцієнту лінійного розширення від плюс 40 °С до 0 °С залежить від вмісту та марки в'язучого.

Збільшення кількості та в'язкості бітуму призводить до зростання значень температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетону. Наведена закономірність співпадає з літературними даними. Зростання в'язкості в'язучого від 90/130 до 60/90 призводить до зростання температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетону в 1,2-1,4 рази при інших рівних умовах. Зростання в'язкості в'язучого від 60/90 до 40/60 призводить до зростання температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетону в 1,1-1,2 рази при інших рівних умовах. Наведена закономірність справедлива для асфальтобетонів виготовлених з використанням БНД та БМП, як для режиму нагріву так і для режиму охолодження.

Для ЩМА при збільшенні в'язкості в'язучого від 90/130 до 60/90 значення температурного коефіцієнту лінійного розширення збільшується менш інтенсивно ніж для звичайних асфальтобетонів і становить 1,05-1,25 рази.

При використанні у складі асфальтобетону в'язучого модифікованого полімером значення температурного коефіцієнту лінійного розширення



асфальтобетону зростають в 1,2 рази у порівнянні з асфальтобетоном виготовленим з використанням бітуму нафтового дорожнього тієї самої в'язкості.

При порівнянні отриманих даних значень температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетонів з даними, які наведено в роботах А.М. Богуславського, Г.К. Сьунї, Н.М. Горелишева, А.М. Онищенко, В.Ф. Невінгловського та інших встановлено, що:

– значення температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетону в діапазоні плюсових температур зростає при зниженні температури, що також підтверджується результатами експериментального дослідження;

– зміна температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетонів змінюється зі зміною температури за нелінійним характером.

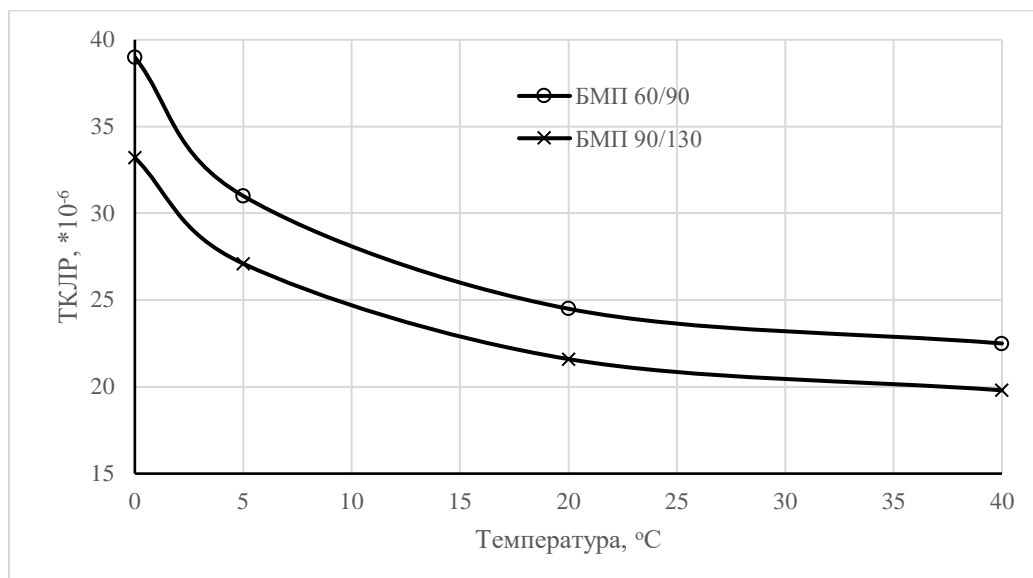


Рисунок 14 – Залежність температурного коефіцієнту лінійного розширення (ЩМА-15) від температури за різними даними

Результати дослідження підтверджують той факт, що температурний коефіцієнт лінійного розширення асфальтобетону залежить від в'язкості та кількості бітуму. Збільшення в'язкості та кількості бітуму, при інших рівних умовах, призводить до збільшення значення температурного коефіцієнту лінійного розширення асфальтобетону. Виявлено, що наведена закономірність справедлива як для режиму охолодження, так і для режиму нагріву [9].

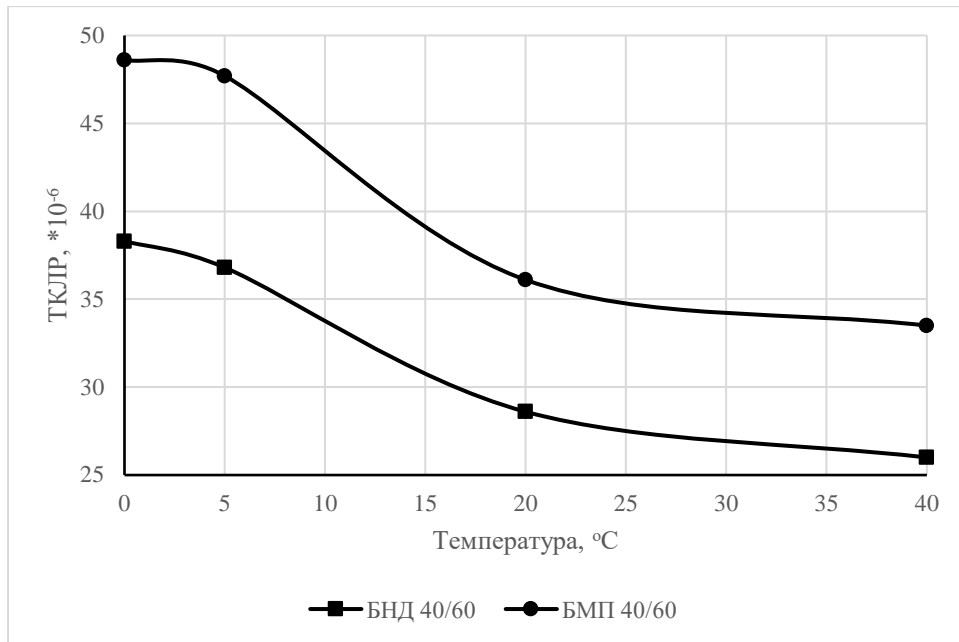


Рисунок 15– Залежність температурного коефіцієнту лінійного розширення (тип Б БНД 60/90 6 %) від температури за різними даними

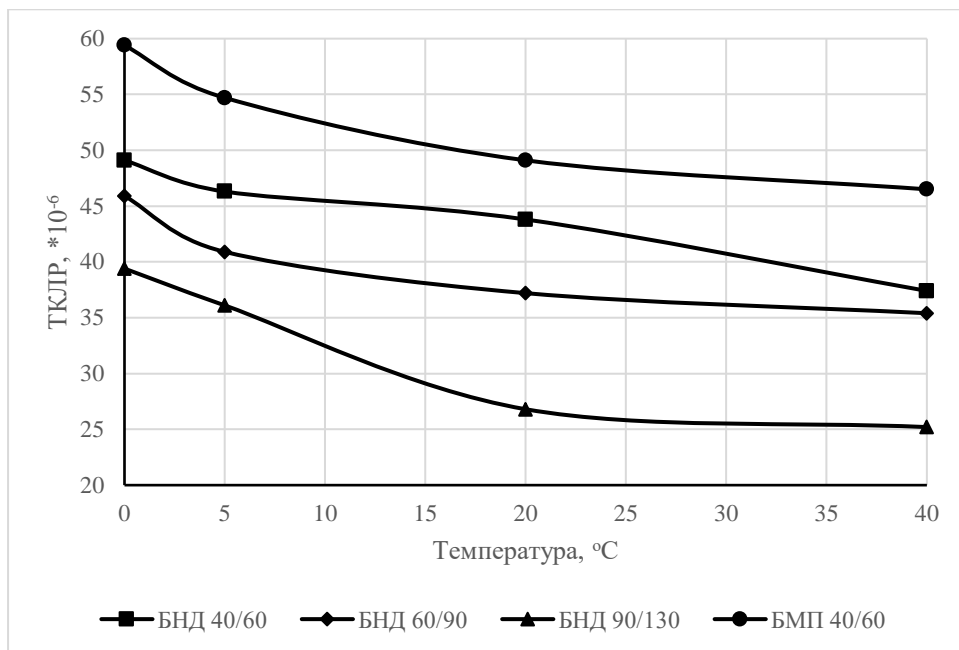


Рисунок 16– Залежність температурного коефіцієнту лінійного розширення (тип Г) від температури за різними даними